

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

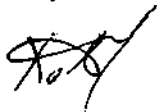
На правах рукописи

Ховричев Максим Юрьевич

ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ КООРДИНАТЫ И СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ 58483 ЗВЕЗД ДО 16.5^m В ПУЛКОВСКИХ ПЛОЩАДКАХ С ГАЛАКТИКАМИ В СИСТЕМЕ ICRS И ИХ ИССЛЕДОВАНИЕ.

Специальность 01.03.01. — астрометрия и небесная механика.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.



Санкт-Петербург — 2003

Работа выполнена в Главной (Пулковской) астрономической
обсерватории Российской Академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Хруцкая Евгения Владимировна

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Витязев Вениамин Владимирович

кандидат физико-математических наук

Гончаров Георгий Александрович

Ведущая организация:

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится "23" октября 2003 г.
в 14 ч. 00 м. на заседании диссертационного совета Д 212.232.15
по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук
при Санкт-Петербургском государственном университете по адре-
су: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский
пр., 28, ауд. 2143 (математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан

< 3 сентября > 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Орлов В.В.



Актуальность темы диссертации.

Развитие космической астрометрии и появление высокоточных космических каталогов с высокой плотностью звезд (HIPARCOS, TYCHO-1) не могло не отразиться на современном развитии наземной астрометрии и фотографической астрометрии в частности.

Появилась возможность значительно повысить точность координат звезд в фотографических каталогах, используя космические каталоги в качестве опорных.

Уже первый анализ почти мгновенных собственных движений космических каталогов показал, что они могут быть существенно улучшены, если использовать для их получения комбинацию наземных и космических каталогов. В связи с этим, большое внимание было уделено повторению редукций старого наблюдательного материала в системе ICRS/HIPARCOS (например, каталог AC2000, вторые редакции каталогов CPC2, TAC).

В результате на основе комбинации данных наземной и космической астрометрии были созданы каталоги ACT, TRC, TYCHO-2, FK6, ARHIP.

Помимо возможности уточнить собственные движения звезд, имеющих в космических каталогах, обработка старого наблюдательного материала в новой опорной системе способствовала и расширению системы ICRS/HIPARCOS на значительное число звезд слабее 12^m , отсутствующих в космических каталогах.

В последние годы для целей астрометрии все чаще используют ПЗС-матрицы. Особенно привлекают астрономов большая пропускная способность этих приемников излучения, возможность быстрой обработки результатов, возможность автоматизации процесса наблюдений и измерений, практически неограниченный срок хранения полученной информации.

Применение ПЗС-матриц в астрометрии осложнено одной технической проблемой. Большинство инструментов, при использовании ПЗС-приемников, имеют малое рабочее поле (доли квадратного градуса). По этой причине для астрометрической редукции ПЗС-наблюдений требуются каталоги с плотностью звезд, превышающей плотность звезд в космических каталогах.

Кроме того, высокоточные современные каталоги, такие как

TYCHO-2, содержат в подавляющем большинстве яркие звезды (до $11^m \div 12^m$). Решение многих задач современной позиционной астрономии требует определения координат слабых объектов ($15^m \div 18^m$ и слабее). Речь идет об определении координат внегалактических радиоисточников по наблюдениям в оптическом диапазоне, объектов пояса Койпера и других небесных тел. Использование ярких звезд в качестве опорных в таком случае может привести к появлению систематических ошибок типа уравнивания блеска, которые способны заметно исказить результаты наблюдений.

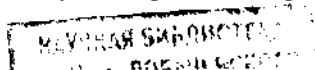
Все это делает проблему построения астрометрических каталогов в системе ICRS, содержащих слабые ($mag > 12^m$) звезды, распределенные с высокой плотностью (300 \div 1000 звезд на квадратный градус), весьма актуальной.

Существуют различные пути "продвижения" в сторону слабых звезд. *Во-первых*, привлечение огромного материала стеклотек обсерваторий, содержащих пластинки со слабыми звездами. Этот фотографический материал был получен в рамках различных наблюдательных программ. Для выполнения повторных редукиций могут быть произведены переизмерения пластинок или, если измерения нецелесообразны, имеется возможность воспользоваться базами данных, содержащих результаты измерений пластинок.

В качестве примера может служить каталог положений и абсолютных собственных движений 58880 звезд в окрестностях южного галактического полюса [1], наблюдательным материалом для которого послужили пластинки программы SPM. В каталоге содержатся координаты звезд от 5^m до 18^m в системе ICRS. Точность положений $0.04'' \div 0.15''$, абсолютных собственных движений $3 mas/год \div 8 mas/год$. Наивысшая точность обеспечена для звезд ярче 15^m . Площадь неба, перекрываемая каталогом, составляет 720 квадратных градусов.

Еще два примера - "Каталог слабых опорных звезд ($12^m \div 14^m$) в 398 полях с внегалактическими радиоисточниками" [2] и каталог 1647 звезд в системе ICRS в малых полях вокруг 23 внегалактических радиоисточников [3].

Во-вторых, определение координат слабых звезд по ПЗС-наблюдениям. Важной задачей становится ПЗС-обзор всего неба. В настоящее время реализуется проект построения каталога UCAC.



Для получения материала используется двойной астрограф Морской обсерватории США, оснащенный ПЗС-приемником $4k \times 4k$ с масштабом $0.9''/\text{пиксел}$. Опубликована первая часть этого каталога UCAC1 [4], содержащая положения и собственные движения 27 миллионов звезд $8^m \div 16^m$ в системе ICRS в южном полушарии неба. Точность положений на эпоху наблюдений для звезд $10^m \div 14^m$ составляет $0.02''$. Для более слабых звезд средняя ошибка координат звезд составляет $0.06''$. Собственные движения имеют точность $5 \text{ mas}/\text{год} \div 15 \text{ mas}/\text{год}$. В качестве первых эпох для вывода собственных движений привлекаются каталоги программ по получению абсолютных собственных движений и USNO-A2.0.

Таким образом, в пост-HIPPARCOS период в развитии фотографической астрометрии наблюдаются две основные тенденции:

1. Переработка ранее полученного материала фотографических наблюдений в новой опорной системе ICRS/HIPPARCOS.
2. Постепенное вытеснение фотографических пластинок ПЗС-матрицами.

Первая тенденция менее затратна и позволяет получать координаты звезд до $17^m \div 18^m$. Второй подход имеет несомненное преимущество в проникающей силе (до $20^m \div 21^m$) и, следовательно, в объеме получаемого материала. Что касается точности получаемых результатов, то имеет место более высокая точность ПЗС-наблюдений по сравнению с фотографическими для звезд до 12^m , для более слабых звезд различие точности ПЗС- и фотографических наблюдений менее существенно. Причиной этого является то, что для надежной редукции ПЗС-кадров необходимо иметь опорный каталог высокой плотности, содержащий достаточно слабые звезды. Это еще один аргумент в пользу обработки материала старых фотографических пластинок. Таким образом, обозначенные тенденции на самом деле взаимосвязаны.

Рассматриваемый в этой работе каталог Pul-3 - одна из попыток распространения системы ICRS на слабые звезды в рамках первой тенденции.

Материалом для создания каталога Pul-3 послужили результаты фотографических наблюдений, полученные на нормальном астрографе Пулковской обсерватории в 1935 - 1986 г.г. в ходе реализации

плана А.Н. Дейча [5] по выводу абсолютных собственных движений звезд с привязкой к галактикам. Задача получения точных экваториальных координат звезд в то время не ставилась.

Наличие высокоточных космических каталогов и присутствие на пластинках, полученных в рамках плана А.Н. Дейча, изображений более 58000 звезд, в основном, $12^m \div 16.5^m$, распределенных с плотностью до 500 звезд на квадратный градус, сделали целесообразным использование данного наблюдательного материала для получения координат слабых звезд. Таким образом, актуальность выполненной работы обусловлена:

- возможностью расширить систему ICRS на более слабые звезды (до 16.5^m) и тем, что слабые звезды могут использоваться как опорные для обработки ПЗС-наблюдений;
- возможностью обеспечить надежные первые эпохи для последующего вывода высокоточных собственных движений звезд.

Цели работы.

- Определение экваториальных координат 58483 звезд в системе ICRS в пулковских площадках с галактиками на среднюю эпоху наблюдений путем астрометрической редукции пластинок с использованием каталога TYCHO-2 в качестве опорного.
- Выявление и исключение систематических ошибок координат звезд, зависящих от положений звезд на пластинке, их блеска и цвета.
- Вычисление новых собственных движений этих звезд в системе ICRS.

Научная новизна работы.

- **Pul-3** – первый большой звездный каталог, содержащий точные экваториальные координаты звезд, построенный на основе фотографических наблюдений, выполненных на нормальном астрографе Пулковской обсерватории. В связи с этим было выполнено детальное исследование систематических ошибок координат звезд, присущих наблюдательному материалу, полученному на данном инструменте.

- Для большинства звезд каталога Pul-3 слабее 12^m впервые получены экваториальные координаты в системе ICRS, пригодные для высокоточных астрометрических работ.
- Впервые по разностям собственных движений *именно* слабых звезд до 16.5^m получены значения компонент вектора угловой скорости вращения системы ICRS (каталог Pul-3) относительно инерциальной системы (каталог Pul-2).
- Полученные новые собственные движения 58483 звезд могут использоваться для различных звездноастрономических исследований.

Научная и практическая значимость работы.

- Звезды каталога Pul-3 расширяют систему ICRS на слабые звезды (до 16.5^m) и могут использоваться в качестве опорных для ведущихся и планируемых ПЗС-наблюдений.
- Координаты звезд каталога Pul-3 могут быть привлечены в качестве первых эпох для получения высокоточных собственных движений слабых звезд в системе ICRS (средняя разность эпох с современными наблюдениями составляет около 40 лет).
- Положения и собственные движения каталога Pul-3 могут быть использованы в качестве входных данных для будущих проектов в области космической астрометрии.

На защиту выносятся:

- Анализ редуцированных моделей, используемых в астрофотографии, методика выявления и исключения систематических ошибок материала фотографических наблюдений при построении каталога Pul-3.
- Каталог положений и собственных движений 58483 звезд в системе ICRS в пулковских площадках с галактиками (Pul-3).
- Исследование полученного каталога Pul-3.

Апробация работы.

Основные результаты, полученные в данной работе, доложены:

- На астрометрических семинарах Пулковской обсерватории (ГАО РАН), на научно-методическом семинаре кафедры астрономии и истории естествознания Нижегородского Государственного Педагогического Университета.
- На Всероссийской астрономической конференции. Санкт-Петербург. 6-12 августа 2001г.
- На международной конференции "Extension and Connection of Reference Frames using CCD ground-based Technique". Николаев, Украина, 10-13 октября 2001г.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Она изложена на 106 страницах, содержит 20 таблиц и 36 рисунков. Список литературы насчитывает 103 наименования.

Содержание диссертации.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели работы, ее новизна, научная и практическая значимость. Приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В Главе I дается краткий исторический обзор наиболее значительных фотографических каталогов положений и собственных движений звезд, полученных за всю историю фотографической астрометрии. Рассматриваются важнейшие фотографические каталоги собственных движений звезд и программы по определению абсолютных собственных движений звезд относительно галактик. Кратко описаны некоторые каталоги, которые построены на основе фотографических наблюдений, полученных на телескопах системы Шмидта.

В первой части речь идет о фотографических каталогах, созданных в эпоху от "Карты неба" до реализации миссии HIPPARCOS. Во второй части обсуждаются основные фотографические каталоги в контексте развития астрометрии в пост-HIPPARCOS период.

Глава II посвящена изложению наиболее часто используемых методов **астрометрической редукции** фотографической пластинки и **ПЗС-кадра**. Обсуждаются достоинства и недостатки различных редукционных моделей в разных условиях.

Рассматривается общая схема исследования и учета систематических ошибок координат звезд и построения современных фотографических каталогов.

В этой главе кратко описан способ получения относительных собственных движений звезд в фотографической астрометрии и рассмотрены методы абсолютизации фотографических собственных движений. Особое внимание уделено процедуре абсолютизации с помощью галактик.

В Главе III дается характеристика наблюдательного материала.

Входными данными для каталога **Pul-3** являются результаты измерений фотографических пластинок, полученных на нормальном астрографе Пулковской обсерватории ($D = 330\text{ мм}$, $F = 3463\text{ мм}$, рабочее поле $-2^\circ \times 2^\circ$) в период с 1935 г. по 1986 г. в рамках плана А.Н. Дейча.

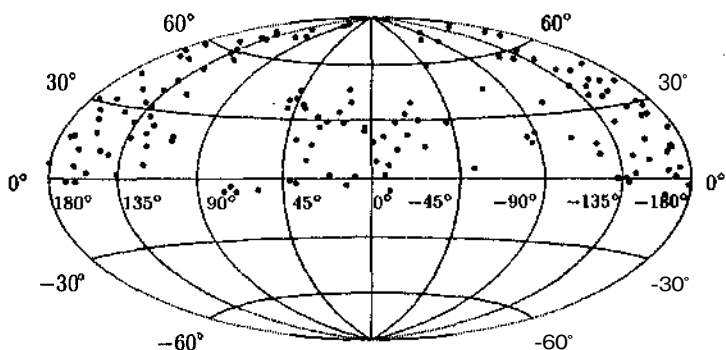


Рис. 1. Распределение пулковских площадок с галактиками по небесной сфере в экваториальной системе координат.

Для каждой из 146 областей неба (их распределение по небесной

сфере показано на рис. 1) в зоне склонений $-5^\circ < \delta < 85^\circ$ были получены три пары пластинок. Для двух пар использовались экспозиции 60 и 5 минут на одной пластинке со сдвигом на $10'$ по склонению между экспозициями. Третья пара снималась с использованием дифракционной решетки с экспозицией 60 минут (дифракционные спутники первого порядка получались на 4.2^m слабее соответствующих им звезд). Разность эпох между пластинками пары составила не менее 20 лет. Подавляющее большинство пластинок первой эпохи были получены в 50-е годы, второй - в 70-е годы.

Для построения каталога Pul-3 использованы измеренные координаты звезд, соответствующие 60-ти минутным экспозициям на пластинках, снятых без использования дифракционной решетки, так как только в этом случае получались изображения слабых звезд $14^m \div 16.5^m$, пригодные для измерений.

Измерения выполнялись на измерительной машине АСКОРЕКОРД в Пулковской обсерватории и были завершены в 80-е годы. Точность измерений составляет $2 \div 3.5$ мкм. Для всех измеренных звезд пулковских пластинок были определены их фотографические звездные величины [6].

Данные рис. 2 свидетельствует о том, что подавляющее большинство звезд материала – это слабые звезды $12^m \div 16.5^m$. Большинство определяемых звезд расположены в пределах $40'$ от оптических центров пластинок (рис. 3).

В качестве опорного каталога использовался каталог TYCHO-2, дающий в среднем $40 \div 65$ опорных звезд в пулковских площадках с галактиками. Точность координат звезд TYCHO-2 на эпохи пулковских наблюдений составляет $\approx 0.1''$ на первую эпоху - 1953.5 г. и $\approx 0.065''$ на вторую - 1976.75 г.

При построении каталога Pul-3 использовались программные пакеты CREADER (Catalog READER) и ASTRORED (ASTROmetric REDuctions) [7], [8]. CREADER позволяет производить всевозможные выборки звезд по заданным параметрам из каталогов с высокой плотностью звезд (HIPPARCOS, TYCHO-1, АСТ, TYCHO-2, USNO-A2.0 и др.). Пакет ASTRORED предназначен для астрометрических редукций от измеренных прямоугольных координат звезд до получения экваториальных координат в системе любого из каталогов, подключенных к CREADER. Создан аппарат для исследования и коррекции систематических ошибок наблюдений.

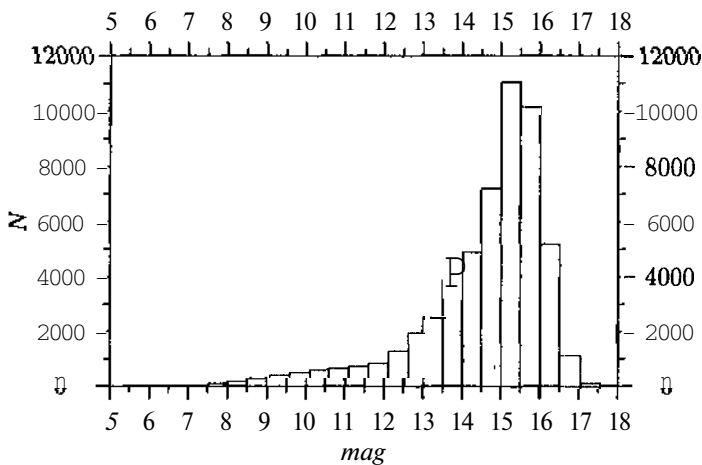


Рис. 2. Распределение звезд в пулковских площадках с галактиками по звездным величинам.

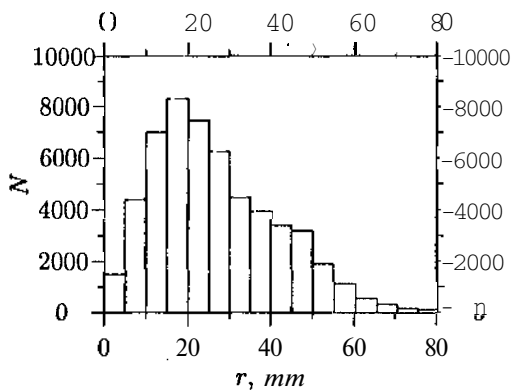


Рис. 3. Распределение звезд в пулковских площадках с галактиками по расстоянию r от оптических центров пластинок.

Экваториальные координаты оптических центров площадок были известны приближенно. Их использование для вычисления тангенциальных координат опорных звезд могло стать источником систематических ошибок. Результаты численного моделирования с использованием фиктивных звезд показали, что в данных условиях выгоднее уточнять экваториальные координаты оптических центров пластинок и выполнять редукцию *методом шести постоянных*, чем использовать *метод восьми постоянных*, который, по идее, должен учитывать неопределенность экваториальных координат оптического центра пластинки. В связи с этим рассмотрены два способа уточнения экваториальных координат оптического центра пластинки [9]. На основе результатов редукции ряда пластинок [10] показано, что уточнение экваториальных координат оптических центров пластинок **предложенными** методами приводит к улучшению точности редукции на $0.03'' \div 0.04''$.

Видимые тангенциальные координаты опорных звезд ξ, η [11, с. 74-82] вычислялись с использованием точных экваториальных координат оптического центра, экваториальных координат опорных звезд, переведенных с помощью собственных движений на на эпоху наблюдений пластинки и исправленных за годичную aberrацию и атмосферную рефракцию.

Редукции выполнялись методом шести постоянных по итерационной схеме. На каждом шаге, после вычисления постоянных пластинок, осуществлялся контроль резко выделяющихся невязок с использованием критерия 3σ . Если таковые обнаруживались, то звезда, давшая максимальное отклонение, исключалась из числа опорных и вычисление постоянных пластинок производилось с оставшимися звездами.

Ошибки единицы веса в среднем по результатам редукций 587 пластинок в 146 пулковских площадках с галактиками составили: $0.24''$ по координате ξ и $0.26''$ по координате η .

Глава IV посвящена выявлению и исключению систематических ошибок из наблюдательного материала. Данными для исследования послужили остаточные разности тангенциальных координат опорных звезд $\Delta\xi = \xi - \tilde{\xi}$, $\Delta\eta = \eta - \tilde{\eta}$. Здесь ξ, η - видимые тангенциальные координаты опорных звезд, $\tilde{\xi}, \tilde{\eta}$ - оценки тангенциальных координат опорных звезд, полученные по постоянным пластинок и измеренным координатам.

В исследованиях [12], [13], [14] сделан вывод о наличии у объектива пулковского нормального астрографа небольшой *комы*.

Влияние комы на координаты звезд описывается уравнениями:

$$\Delta\xi = c\xi(mag - mag_0), \quad \Delta\eta = c\eta(mag - mag_0). \quad (1)$$

Здесь c - коэффициент комы, mag_0 - нуль-пункт комы.

Для оценивания параметров комы были разработаны два способа, основанные на уравнениях (1). Остаточные разности тангенциальных координат звезд группировались в зависимости от блеска и положения звезд на пластинке. В каждой группе определялись средние значения остаточных разностей. В первом способе параметры комы оценивались по осредненным остаточным разностям тангенциальных координат звезд, во втором - по радиальным составляющим остаточных разностей тангенциальных координат звезд [15].

С помощью численного моделирования подтверждено, что предложенные способы позволяют надежно определить параметры комы.

Для уменьшения влияния рефракции и атмосферной дисперсии на результаты оценивания параметры комы определялись по площадкам пулковской зенитной зоны ($\delta - 59^\circ \pm 5^\circ$), где эти эффекты малы. В результате исследований подтверждено наличие комы у объектива пулковского нормального астрографа и определены ее параметры: $c = 0.0016 \pm 0.0002'' \cdot \text{мм}^{-1} \cdot \text{mag}^{-1}$ и $mag_0 = 11.3^m \pm 1.2^m$.

Для контроля аналогичное исследование выполнено по пластинкам пулковской зенитной зоны, снятым с дифракционной решеткой. Как показали исследования, параметры комы, найденные по основному материалу, не противоречат результатам исследований, полученным по пластинкам, снятым с дифракционной решеткой [16]. Это подтверждает правомерность использования найденных параметров комы при обработке слабых определяемых звезд $14^m \div 16.5^m$.

Представление о качестве исключения комы дает рис. 4. На этом рисунке показаны зависимости разностей тангенциальных координат $\Delta\xi$ от $\tilde{\xi}$ для звезд $12.5^m < mag < 13.5^m$ по всему материалу. Так как интервал по блеску не превышает 1^m и отстоит более чем на 1^m от значения нуль-пункта комы, то, согласно уравнениям (1), на графике зависимость $\Delta\xi(\tilde{\xi})$ должна выглядеть как прямая, наклоненная к оси $\tilde{\xi}$ и проходящая через начало координат. Показанная на

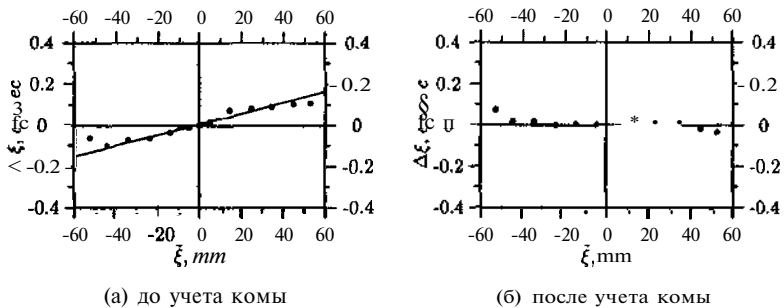


Рис. 4. Зависимости $\Delta \xi$ от $\tilde{\xi}$ для звезд $12.5^m < mag < 13.5^m$. (а) до учета комы, (б) после учета комы. Каждая точка на графиках получена как результат осреднения большого числа отдельных разностей (от 50 до 1200).

рис. 4 (а) зависимость $\Delta \xi(\tilde{\xi})$, полученная до учета комы, подтверждают это. Рис. 4 (б) свидетельствует об успешном исключении влияния комы на координаты звезд.

После внесения в координаты звезд поправок за кому вновь были образованы разности тангенциальных координат звезд: $\Delta \xi = \xi - \xi_{coma}$, $\Delta \eta = \eta - \eta_{coma}$. Здесь ξ_{coma} , η_{coma} - оценки Тангенциальных координат опорных звезд с учетом поправок за кому.

Для того, чтобы иметь возможность судить об *уравнении блеска* для слабых звезд $14^m \div 16.5^m$, дополнительно для исследования были привлечены остаточные разности тангенциальных координат звезд, полученные в результате редукций 70 пар пластинок с дифракционной решеткой, равномерно распределенных по всем зонам склонений.

Полученные разности $\Delta \xi$, $\Delta \eta$ исследовались с целью выявить и исключить *уравнение блеска* [17].

Специальные исследования показали отсутствие значимых различий уравнения блеска для разных видов фотоэмульсий.

Основываясь на данных предварительных исследований [18], [19] уравнение блеска исследовалось отдельно для каждой из девяти десятиградусных зон по склонению (от -5° до 85°). На рис. 5, для примера, приведены кривые уравнения блеска для отдель-

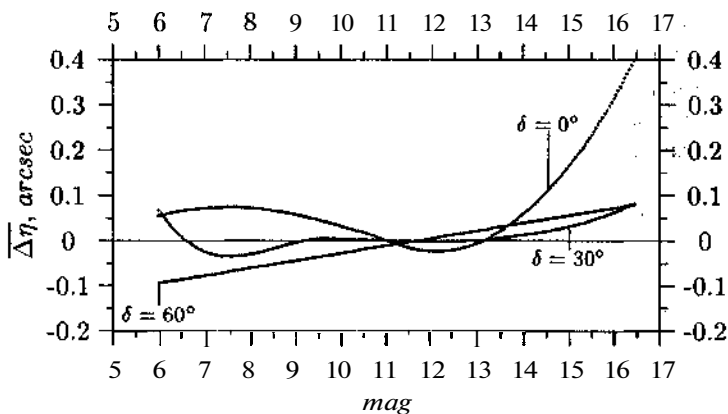


Рис. 5. Примеры уравнения блеска $\overline{\Delta\eta}(mag)$ для различных зон по склонению.

ных зон по склонению.

В каждой зоне ход средних значений разностей представлялся степенным многочленом или сплайном, образованным из степенных многочленов. Использование сплайнов с одной узловой точкой связано с различием характера уравнения блеска для ярких и слабых звезд. Узловая точка выбиралась в центральной части всего доступного диапазона звездных величин ($mag \approx 11^m$), для которой уравнение блеска незначительно. В каждой зоне склонений наилучшая степень аппроксимации подбиралась исходя из значений ошибок единицы веса. Оптимальной считалась степень многочлена или комбинация степеней многочленов сплайна, начиная с которой улучшение точности было незначимым. В большинстве случаев это были многочлены 2-ой и 3-ей степени. Такие же степени имели многочлены, из которых строились сплайны.

В результате исследований было показано, что систематические ошибки, связанные с уравнением блеска, наиболее заметны для ярких ($6^m \div 8^m$) и слабых ($15^m \div 16^m$) звезд. Для всех зон по склонению были вычислены параметры уравнения блеска по обоим координатам (коэффициенты многочленов и сплайнов). Данные параметры

использовались при исключении уравнения блеска. В результате улучшение точности координат звезд составило $0.01'' \div 0.02''$ в зависимости от звездной величины.

Обнаруженное различие уравнения блеска в разных зонах по склонению может быть вызвано комбинацией нескольких причин, среди которых наиболее значимы **ошибки**, обусловленные рефракционными эффектами и зависимостью коэффициента атмосферной дисперсии от звездной величины, а также эффектами, связанными с работой часового механизма астрографа, децентрировкой линз объектива астрографа, и различной пропорцией ярких и слабых опорных звезд в площадках разных зон по склонению.

Материалом для изучения влияния *уравнения цвета* стали разности $\Delta\xi = \xi - \tilde{\xi}_{mag}$, $\Delta\eta = \eta - \tilde{\eta}_{mag}$. Здесь ξ_{mag} , η_{mag} - оценки тангенциальных координат опорных звезд с учетом поправок за кому и уравнение блеска. Все разности были разделены на группы по зонам склонения (от -5° до 85° с шагом 10°).

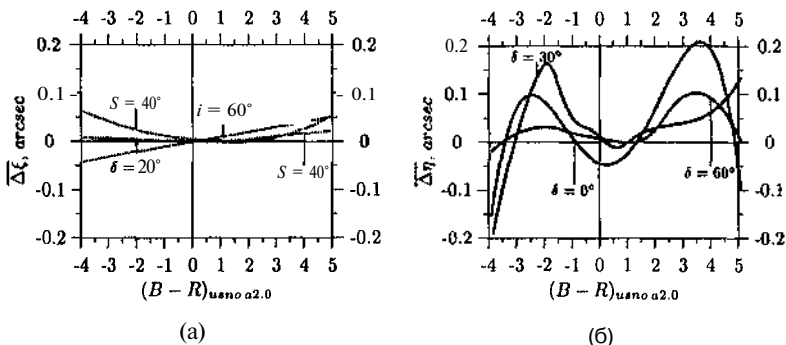


Рис. 6. Примеры уравнения цвета по $(B - R)_{usno\ a2.0}$ для различных зон по склонению.

Исследования показали, что нет значимых расхождений параметров уравнения цвета для пластинок разных групп по фотоэмульсии.

Уравнение цвета для координаты ξ в большинстве зон оказалось незначимым, но хорошо заметным для координаты η , особенно в экваториальной зоне (примеры уравнения цвета в разных зонах по

склонению приведены на рис. 6).

Так как в подавляющем большинстве определяемые звезды на момент выполнения работы могли быть снабжены только величинами B и R из каталога USNO-A2.0, определение параметров уравнения Цвета выполнялось относительно величины $(B - R)_{usno\ a2.0}$. Для этого использовался метод, аналогичный тому, что применялся для исследования и исключения уравнения блеска. Ход средних значений разностей аппроксимировался степенными многочленами и сплайнами из степенных многочленов.

Улучшение точности координат звезд после исключения уравнения цвета составило до $0.02''$ в зависимости от цвета звезд. Для контроля качества исключения уравнения цвета использовались показатели цвета $(B - V)_{tycho2}$, известные только для опорных звезд. Было выявлено, что полностью исключить ошибки, связанные с уравнением цвета, из координат звезд, используя данные USNO-A2.0, невозможно по причине невысокой точности величин B и R . Например, в экваториальной зоне ошибки $\Delta\eta$ до исключения уравнения цвета составляли для звезд спектрального класса $B - \approx -0.11''$, а для спектрального класса $M9 - \approx 0.11''$. После введения поправок за уравнение цвета по $(B - R)_{usno\ a2.0}$ остаточные ошибки $\Delta\eta$ для звезд ранних и поздних спектральных классов составили: для класса $B - \approx -0.04''$ и $M9 -$ и $0.04''$.

Главной причиной уравнения цвета в пулковских площадках с галактиками является атмосферная дисперсия. В пользу этого вывода свидетельствует то, что коэффициенты уравнения цвета, вычисленные по опорным звездам относительно $(B - V)_{tycho2}$, линейно возрастают по мере увеличения зенитного расстояния.

В целом, исключение всех найденных остаточных систематических ошибок и уточнение экваториальных координат оптических центров пластинок привело к улучшению точности на $0.055''$ по прямому восхождению и на $0.044''$ по склонению.

В Главе V приведен алгоритм вычисления экваториальных координат и собственных движений звезд в системе ICRS на среднюю эпоху пулковских наблюдений. Описана структура данных каталога Pul-3.

Для объединения наблюдательного материала первой и второй эпох и вычисления экваториальных координат звезд на среднюю

эпоху пулковских наблюдений были получены новые собственные движения.

Собственные движения определялись из всех возможных комбинаций пар пластинок первой и второй эпох. Количество полученных таким образом собственных движений для одной звезды колебалось от 9 (при наличии трех пар пластинок) до 1 (при одной паре пластинок).

В дальнейшем определялось средневзвешенное из всех полученных значений компонент собственного движения каждой звезды. Веса назначались пропорционально разности эпох между пластинками.

Таблица 1. Среднеквадратические ошибки координат и собственных движений по внутренней и внешней сходимости (по отношению к ТУГНО-2) для различных зон по склонению.

| зона δ | внутренняя точность | | | | внешняя точность | | | |
|------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| | $\epsilon_{\alpha \cos \delta}$ | ϵ_{δ} | $\epsilon_{\mu_{\alpha} \cos \delta}$ | $\epsilon_{\mu_{\delta}}$ | $\sigma_{\alpha \cos \delta}$ | σ_{δ} | $\sigma_{\mu_{\alpha} \cos \delta}$ | $\sigma_{\mu_{\delta}}$ |
| | mas/god | | | | mas/god | | | |
| $-5^{\circ} \div 5^{\circ}$ | 0.090 | 0.098 | 5.5 | 6.0 | 0.141 | 0.160 | 9.2 | 10.2 |
| $5^{\circ} \div 15^{\circ}$ | 0.086 | 0.086 | 5.3 | 5.3 | 0.136 | 0.159 | 8.7 | 10.0 |
| $15^{\circ} \div 25^{\circ}$ | 0.079 | 0.088 | 4.5 | 5.1 | 0.130 | 0.148 | 9.2 | 9.1 |
| $25^{\circ} \div 35^{\circ}$ | 0.085 | 0.085 | 5.1 | 5.2 | 0.154 | 0.159 | 10.2 | 11.2 |
| $35^{\circ} \div 45^{\circ}$ | 0.079 | 0.078 | 4.8 | 4.8 | 0.151 | 0.157 | 9.7 | 10.1 |
| $45^{\circ} \div 55^{\circ}$ | 0.079 | 0.082 | 4.8 | 4.9 | 0.157 | 0.159 | 11.4 | 12.5 |
| $55^{\circ} \div 65^{\circ}$ | 0.077 | 0.080 | 4.9 | 5.1 | 0.162 | 0.175 | 9.9 | 12.1 |
| $65^{\circ} \div 75^{\circ}$ | 0.074 | 0.078 | 4.6 | 4.8 | 0.126 | 0.142 | 8.0 | 9.8 |
| $75^{\circ} \div 85^{\circ}$ | 0.073 | 0.078 | 4.8 | 5.1 | 0.127 | 0.142 | 8.8 | 9.9 |
| все зоны | 0.080 | 0.084 | 4.9 | 5.1 | 0.142 | 0.155 | 9.2 | 10.1 |

Полученные новые собственные движения использовались для вычисления экваториальных координат каждой звезды каталога Pul-3 на среднюю эпоху наблюдений. Средняя эпоха наблюдений каталога Pul-3 — 1963.25 г.

Положения подавляющего большинства звезд были определены по двум парам пластинок в каждой площадке (4 наблюдения).

В таблице 1 даны Среднеквадратические ошибки координат каталога Pul-3 по внутренней сходимости и внешней сходимости с каталогом ТУСНО-2 для средней эпохи пулковских наблюдений для разных зон по склонению. Как видно из таблицы, явной зависимости ошибок от зоны склонения не обнаруживается для обеих координат. На рис. 7 показаны зависимости ошибок координат и собственных

движений звезд каталога Pul-3 от звездной величины. Средние значения среднеквадратических ошибок по внутренней сходимости по всему каталогу на среднюю эпоху наблюдений (1963.25 г.) составляют: для координат звезд - $0.08''$, для собственных движений - 5 mas/год .

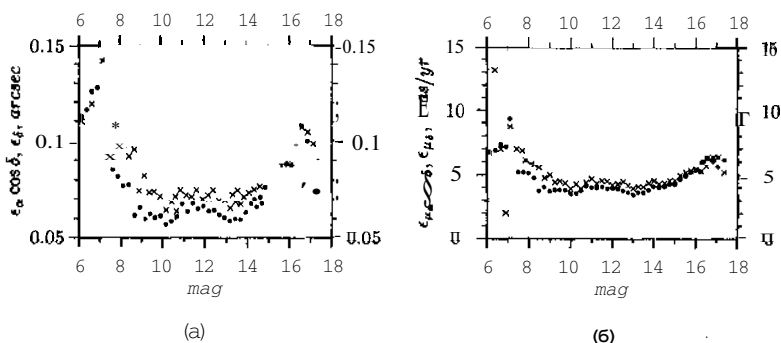


Рис. 7. Зависимости среднеквадратических ошибок по внутренней сходимости для координат (а) и собственных движений (б) звезд каталога Pul-3 от звездной величины (· - по прямому восхождению, х - по склонению).

В Главе VI рассматриваются результаты сравнения координат и собственных движений звезд из каталога Pul-3 с данными каталогов TYCHO-2, ARHIP и USNO-B1.0.

На рис. 8 представлены систематические разности координат звезд в смысле (TYCHO-2 - PUL-3) в зависимости от склонения и прямого восхождения (7538 общих звезд). Как видно из графиков, систематические расхождения невелики и, в основном, не выходят за пределы $\pm 0.01''$. Это подтверждает однородность и хорошее качество привязки каталога Pul-3 к системе каталога TYCHO-2.

Из сравнения каталога Pul-3 с каталогом ARHIP (1035 общих звезд) были получены средние значения систематических разностей ($\Delta\alpha \cos \delta = 0.0009''$, $\Delta\delta = -0.0022''$, $\Delta\mu_\alpha \cos \delta = -0.05 \text{ mas/год}$, $\Delta\mu_\delta = 0.7 \text{ mas/год}$) и среднеквадратические ошибки координат и собственных движений звезд каталога Pul-3 по

внешней сходимости (относительно каталога ARHIP) ($\sigma_{\alpha \cos \delta} = 0.135''$, $\sigma_{\delta} = 0.153''$, $\sigma_{\mu_{\alpha \cos \delta}} = 10.1 \text{ mas/год}$, $\sigma_{\mu_{\delta}} = 11.0 \text{ mas/год}$).

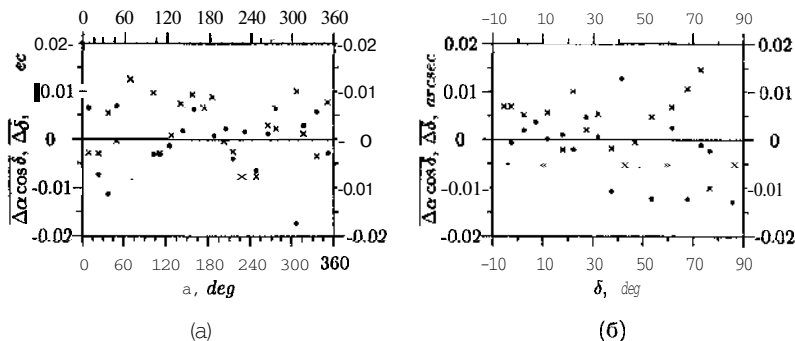


Рис. 8. Средние значения систематических разностей $\Delta\alpha \cos \delta$ (.), $\Delta\delta$ (x) в смысле (TYCHO-2 - PUL-3) в зависимости от прямого восхождения (a) и склонения (б).

Для 16 площадок радиусом 1° в разных зонах по склонению и прямому восхождению произведено предварительное сравнение каталога Pul-3 с каталогом USNO-B1.0. Всего в сравнении использовалось 5042 звезды слабее 12^m . Средние значения разностей экваториальных координат в смысле (Pul-3 - USNO-B1.0) по всей выборке составили: $\overline{\Delta\alpha \cos \delta} = -0.003''$, $\overline{\Delta\delta} = -0.038''$. Их среднеквадратические ошибки оказались равны $\sigma_{\alpha \cos \delta} = 0.176''$, $\sigma_{\delta} = 0.198''$.

Аналогичное сравнение координат звезд каталогов USNO-B1.0 с каталогом UCAC1 было сделано для южного неба (5 площадок радиусом 1° , 16035 звезд слабее 12^m). Полученные средние значения систематических разностей и их среднеквадратических ошибок составили: $\overline{\Delta\alpha \cos \delta} = 0.015''$, $\overline{\Delta\delta} = -0.095''$, $\sigma_{\alpha \cos \delta} = 0.193''$, $\sigma_{\delta} = 0.195''$.

Выполненное исследование показало, что точность каталога USNO-B1.0 неоднородна. Отдельные значительные величины разностей ($> 0.3''$) присутствовали как среди разностей вида (Pul-3 - USNO-B1.0), так и среди разностей вида (UCAC1 - USNO-B1.0). Величины разностей сопоставимы в обоих

сравнениях. Однако, в целом, астрометрическая точность каталога USNO-B1.0, заявленная авторами (0.2" на эпоху J2000) [20], реальна. Оба сравнения показали присутствие в каталоге USNO-B1.0 уравнения яркости, особенно заметное для звезд слабее $14^m \div 15^m$. Уравнение цвета в каталоге USNO-B1.0 носит нелинейный характер.

По разностям собственных движений звезд каталога Pul-3 и пулковских абсолютных собственных движений (каталог Pul-2) были определены компоненты вектора угловой скорости вращения между каталогом Pul-3 (система ICRS, реализованная каталогом TYCHO-2) и каталогом Pul-2 (собственные движения, абсолютизированные с помощью галактик).

Для каждой из 146 площадок вычислялись средние значения разностей собственных движений $\overline{\Delta\mu_\alpha \cos \delta}$ и $\overline{\Delta\mu_\delta}$.

Компоненты вектора угловой скорости вращения ω_x , ω_y , ω_z между системами каталогов Pul-3 и Pul-2 определялись из уравнений

$$\begin{aligned}\overline{\Delta\mu_\alpha \cos \delta} &= -\omega_x \sin \delta \cos \alpha - \omega_y \sin \delta \sin \alpha + \omega_z \cos \delta, \\ \overline{\Delta\mu_\delta} &= \omega_x \sin \alpha - \omega_y \cos \alpha.\end{aligned}$$

Уравнения решались совместно методом наименьших квадратов.

В результате общего решения по 50820 звездам ($7^m - 16.5^m$) значения компонент угловой скорости вращения составили:

$$\begin{aligned}\omega_x &= -0.75 \pm 0.91 \text{ mas/год}, \quad \omega_y = -0.71 \pm 0.74 \text{ mas/год}, \\ \omega_z &= -2.05 \pm 0.77 \text{ mas/год}.\end{aligned}$$

Сделан вывод о значимости вращения относительно оси Z . Полученные значения ω_x , ω_y , ω_z согласуются с результатами определения этих величин из сравнения собственных движений звезд каталога HIPPARCOS с абсолютными собственными движениями, полученными в рамках программы NPM [21].

В Заключение подводятся итоги работы. Рассматриваются возможности использования данных каталога Pul-3 в астрономической практике и перспективы дальнейших исследований.

В настоящее время каталог Pul-3 [22] имеется на машинных носителях в Лаборатории фотографической астрометрии Пулковской обсерватории (ГАО РАН). Планируется передача каталога в

Центр астрономических данных в Страсбурге (Centre de Donnees astronomiques de Strasbourg).

Выполненная работа показала, что *пулковский нормальный астрограф* **пригоден для выполнения** больших работ, целью которых является построение каталогов положений слабых звезд.

Хорошие технические характеристики пулковского нормального астрографа (устойчивость системы инструмента, хорошее качество объектива) позволяют утверждать, что при оснащении инструмента ПЗС-приемником он может быть использован для выполнения работ, не уступающих по точности работам, проводимым за рубежом.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Yu., Bronnikova N.M. The first results of working up the Pulkovo photographic plates with galaxies with a view to obtain coordinates of the faint stars in ICRS system. //Extension and connection of reference frames using ground based CCD technique.// International astronomical conference. - Nikolaev: Atoll., 2001. -P. 265 - 274.
2. Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю., Бронникова Н.М. Определение координат 6722 звезд вдоль главного меридионального сечения Галактики в системе ICRS по материалам пулковских фотографических наблюдений //Деп. в ВИНТИ 11.07.2002. - 2002. 1299-B2002. -10 с.
3. Ховричев М.Ю. Исследование систематических ошибок наблюдательного материала, использованного при построении каталога Pul-3. //Деп. в ВИНТИ 11.07.2002. - 2002. 1298-B2002. -12 с.
4. Ховричев М.Ю., Хруцкая Е.В. Выборка данных из современных каталогов с высокой плотностью звезд и проведения редукций астрометрических наблюдений. //Деп. в ВИНТИ 11.07.2002. - 2002. 1300-B2002. -12 с.
5. Ховричев М.Ю. Исследование и учет систематических ошибок, связанных с влиянием комы объектива, при построении каталога PUL-3. //Известия ГАО РАН в Пулкове.-2002. 216.- С.291 -299.

6. Ховричев М.Ю. Исследование и учет систематических ошибок, связанных с неопределенностью положения оптического центра фотопластинок, при построении каталога Pul-3. //Известия ГАО РАН в Пулкове.-2002. 216.- С.300 - 305.
7. Ховричев М.Ю. Уравнение блеска и цвета в пулковских площадках с галактиками. //Известия ГАО РАН в Пулкове.-2002. 216.- С.306 - 319.
8. Ховричев М.Ю., Кравцов Д.Н. Исследование комы объектива пулковского нормального астрографа на основе пластинок, полученных с дифракционной решеткой. //Известия ГАО РАН в Пулкове.-2002. 216.- С.320 - 323.
9. Ховричев М.Ю., Хруцкая Е.В. CREADER и ASTRORED - программные пакеты для выборки данных из каталогов с высокой плотностью звезд и выполнения астрометрических редукций. //Известия ГАО РАН в Пулкове.-2002. 216.- С.324 - 335.
10. Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю., Бронникова Н.М. Pul-3: каталог экваториальных координат и собственных движений 58239 звезд в системе ICRS в пулковских площадках с галактиками. //Известия ГАО РАН в Пулкове.-2002. 216.- С.336 - 348.

Личный вклад автора.

Автор принимал участие в постановке задач и интерпретации всех полученных результатов. Все исследования, связанные с выявлением и учетом систематических ошибок наблюдательного материала (3, 5, 6, 7), а также исследование полученного каталога Pul-3 выполнено автором. В работе (8) автору принадлежит идея и осуществление примерно 50% всех необходимых вычислений. Автором разработана большая часть необходимого программного обеспечения. Работы, связанные с редукциями пластинок и вычислением координат и собственных движений звезд, выполнены совместно с Е.В. Хруцкой в равной доле участия. Н.М. Бронникова участвовала в работах (1, 2, 10) в качестве консультанта по наблюдательному материалу.

Литература.

- [1] Platais I., Girard T.M., Kozhurina-Platais V., van Altena W.F. The Southern proper motion program. II. A catalog at the south galactic pole. //The Astronomical Journal. - 1998. Vol. 116. -P. 2556-2564.
- [2] de Vegt C., Hindsley R., Zacharias N., Winter L. A catalog of faint reference stars in 398 fields of extragalactic radio reference frame sources. //The Astronomical Journal. - 2001. Vol. 121. -P. 2815-2818.
- [3] Dement'eva A.A. The reference stars reduced to ICRS for CCD-observations of 23 ERS. //Extension and connection of reference frames using ground based CCD technique.// International astronomical conference. -Nikolaev: Atoll., 2001. -P. 96 - 102.
- [4] Zacharias N., Rafferty T.J., Urban S.E., Zacharias M.I., Wycoff G.L. The UCAC as Input Catalog for FAME. //IAU Colloquium 180, 2000. -P. 80-84.
- [5] Дейч А.Н. Использование внегалактических объектов для построения абсолютной системы собственных движений звезд. Доклад на VIII съезде Международного астрономического союза, Рим. 1952. -М., 1952, 36 с.
- [6] Бронникова Н.М., Бобылев В.В., Шахт Н.А., Усович С.А. О точности определения фотографических звездных величин звезд в площадках с галактиками. //Известия ГАО РАН в Пулкове. - 1996. 210. -С. 250-257.
- [7] Ховричев М.Ю., Хруцкая Е.В. CREADER и ASTRORED - программные пакеты для выборки данных из каталогов с высокой плотностью звезд и выполнения астрометрических редукций. //Известия ГАО в Пулкове. - 2002. 216. -С. 324-335.
- [8] Ховричев М.Ю., Хруцкая Е.В. Выборка данных из современных каталогов с высокой плотностью звезд и проведения редукций астрометрических наблюдений. //Деп. в ВИНТИ 11.07.2002. - 2002. 1300-B2002. -12 с.

- [9] Ховричев М.Ю. Исследование и учет систематических ошибок, связанных с неопределенностью положения оптического центра фотопластинок, при построении каталога P_{ul}-3. //Известия ГАО в Пулкове. - 2002. 216. -С. 300 - 305.
- [10] Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю., Бронникова Н.М. Определение координат 6722 звезд вдоль главного меридионального сечения Галактики в системе ICRS по материалам пулковских фотографических наблюдений. //Деп. в ВИНТИ 11.07.2002. - 2002. 1299-B2002. -10 с.
- [11] Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии. -М.: Наука, 1989. - 264 с.
- [12] Дейч А.Н. К вопросу о влиянии комы на определение фотографического положения объекта на пластинке. //Труды 12-й астрометрической конференции СССР. Ленинград. 1955 г. -Л: изд. ГАО в Пулкове, 1957. -С. 351 - 354.
- [13] Фатчихин Н.В. Исследование уравнения блеска с дифракционной решеткой в Пулкове. //Труды 12-й астрометрической конференции СССР. Ленинград. 1955 г. -Л: изд. ГАО в Пулкове, 1957. -С. 355 - 368.
- [14] Бобылев В.В. Сравнение собственных движений звезд каталогов P_{ul}-2 и TRC. //Известия ГАО в Пулкове. - 2000. 214. -С. 286-293.
- [15] Ховричев М.Ю. Исследование и учет систематических ошибок, связанных с влиянием комы объектива, при построении каталога PUL-3. //Известия ГАО в Пулкове. - 2002. 216. -С. 291 - 299.
- [16] Ховричев М.Ю., Кравцов Д.Н. Исследование комы объектива пулковского нормального астрографа на основе пластинок, полученных с дифракционной решеткой. //Известия ГАО в Пулкове. - 2002. 216. -С. 320 - 323.
- [17] Ховричев М.Ю. Уравнение блеска и цвета в пулковских площадках с галактиками. //Известия ГАО в Пулкове. - 2002. 216. -С. 306 - 319.

- [18] Ховричев М.Ю. Исследование систематических ошибок наблюдательного материала, использованного при построении каталога Pul-3. //Деп. в ВИНТИ 11.07.2002. - 2002. 1298-B2002. -12 с.
- [19] Khrutskaya E.V., Khovritchev M.Yu., Bronnikova N.M. The first results of working up the Pulkovo photographic plates with galaxies with a view to obtain coordinates of the faint stars in ICRS system. //Extension and connection of reference frames using ground based CCD technique.//International astronomical conference. -Nikolaev: Atoll., 2001. -P. 265 - 274.
- [20] Monet D.G., Levine S.E., Canzian B., Abies H.D., Bird A.R., Dahn C.C., Guetter H.H., Harris H.C., Henden A.A., Leggett S.K., Levison H.F., Luginbuhl C.B., Martini J., Monet A.K.B., Munn J.A., Pier J.R., Rhodes A.R., Riepe B., Sell S., Stone R.C., Vrba F.J., Walker R.L., Westerhout G., Brucato R.J., Reid I.N., Hartley W.S.M., Read M. A., Tritton S. B. THE USNO-B CATALOG. //The Astronomical Journal. - 2003. Vol. 125. -P. 984-993.
- [21] Kovalevsky J., Lindegren L., Perryman M.A.C., Hemenway P.D., Johnston K.J., Kislyuk V.S., Lestrade J.F., Morrison L.V., Platais I., Roeser S., Schilbach E., Tucholke H.-J., de Vegt C., Vondrak J., Arias F., Gontier A.M., Arenou A.M., Brosche P., Florkowski D.R., Garrington S.T., Preston R.A., Ron C., Rybka S.P., Scholz R.-D., Zacharias N. The Hipparcos Catalogue as a realisation of the extragalactic reference system. //Astronomy and Astrophysics. - 1997. Vol. 323. -P. 620-633.
- [22] Хруцкая Е.В., Ховричев М.Ю., Бронникова Н.М. Pul-3: каталог экваториальных координат и собственных движений 58239 звезд в системе ICRS в пулковских площадках с галактиками. //Известия ГАО в Пулкове. - 2002. 216. -С. 336 - 348.